

中国語の元素周期表：その地球化学的アプローチ

著者	塩澤 豊志
雑誌名	武蔵野大学環境研究所紀要
号	6
ページ	1-13
発行年	2017-03-01
URL	http://id.nii.ac.jp/1419/00000372/

中国語の元素周期表

—その地球化学的アプローチ—

Geochemical Approach to the Periodic Table of Elements Described with the Chinese Language

塩澤 豊 志*
Toyoshi Shiozawa

1 はじめに

新元素ニホニウム (nihonium;Nh) が元素周期表の一席 (113番) を占めることになる見通しである。世界的に周期表への関心が高まっているが、当然、国によって言語によって用いられているものが異なる。日本では図1に示したタイプの周期表が一般的である。教育上の配慮から見方についてのガイドが加えられている場合が多い。世界で最も公式な周期表は、原子量や元素記号を決めている国際組織 国際純正・応用化学連合 (IUPAC) が発表したもので、WEB上に公開されている (図2)。113番元素の元素記号は、2016年10月現在、Uut 読み方はウンウントリチウムで、未発見元素に対して暫定的に与えられた113を意味するラテン文字である。原子番号114番のフレロビウム (Fl) と116番のリバモリウム (Lv) は、2012年5月30日にIUPACによって英語元素名および元素記号が決定された。

原子番号がウランU (原子番号92) より大きい元素は超ウラン元素と呼ばれ、いずれも人工の放射性元素である。したがって、いわゆるアクチノイド元素のうち93番ネプツニウム以降の元素は全て放射性である。人工の元素とは、加速器を用いた核反応によってつくられる元素のことで、新元素発見の確定も α 崩壊を観測することで行われる。113番元素の合成は、重イオン線型加速器 (RILAC) でなされ、 $^{70}_{30}\text{Zn}$ を光速の10%まで加速させてビームとし、標的である $^{209}_{83}\text{Bi}$ に照射して行われた。

周期表3族元素は希土類 (レアアース) と呼ばれている。存在量でその大部分を占めるランタノイド元素 (ランタンLaからルテチウムLuまでの15元素) は、強力な永久磁石であるネオジム磁石 (Nd-Fe-B磁石) に代表されるように、現代文明社会に欠かせない素材となっている。2014年度酸化物換算で、レアアースの世界埋蔵量は、中国42%、その他諸国32%、ブラジル17%であるが、生産量となると中国が86%を占めている。2位アメリカの6%と比較すると、レアアースの世界生産量では中国がダントツであることがわかる。その世界需要の半分を占めるレアアース先進国はわが国である。わが国では、ネオジムとジスプロシウムはほぼ100%が中国か

*工学部客員教授 (環境システム学科)

元素の 周期表

族 番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	族 番号
1	1H 水素 1.008	<div>元素記号</div> <div>原子番号</div> <div>元素名</div> <div>原子量</div> <div>.....金属元素 (□は半導体)</div> <div>.....非金属元素</div>																2He ヘリウム 4.003	1
2	3Li リチウム 6.941	4Be ベリリウム 9.012											5B ホウ素 10.81	6C 炭素 12.01	7N 窒素 14.01	8O 酸素 16.00	9F フッ素 19.00	10Ne ネオン 20.18	2
3	11Na ナトリウム 22.99	12Mg マグネシウム 24.31											13Al アルミニウム 26.98	14Si ケイ素 28.09	15P リン 30.97	16S 硫黄 35.45	17Cl 塩素 35.45	18Ar アルゴン 39.95	3
4	19K カリウム 39.10	20Ca カルシウム 40.08	21Sc スカンジウム 44.96	22Ti チタン 47.88	23V バナジウム 50.94	24Cr クロム 52.00	25Mn マンガン 54.94	26Fe 鉄 55.85	27Co コバルト 58.93	28Ni ニッケル 58.69	29Cu 銅 63.55	30Zn 亜鉛 65.39	31Ga ガリウム 69.72	32Ge ゲルマニウム 72.61	33As ヒ素 74.92	34Se セレン 78.96	35Br 臭素 79.90	36Kr クリプトン 83.80	4
5	37Rb ルビウム 85.47	38Sr ストロンチウム 87.62	39Y イットリウム 88.91	40Zr ジルコニウム 91.22	41Nb ニオブ 92.91	42Mo モリブデン 95.94	43Tc テクネチウム (99)	44Ru ルルチウム 101.1	45Rh ロジウム 102.9	46Pd パラジウム 106.4	47Ag 銀 107.9	48Cd カドミウム 112.4	49In インジウム 114.8	50Sn スズ 118.7	51Sb アンチモン 121.8	52Te テルル 127.6	53I ヨウ素 126.9	54Xe キセノン 131.3	5
6	55Cs セシウム 132.9	56Ba バリウム 137.3	* 57~71 ランタノイド	72Hf ハフニウム 178.5	73Ta タンタル 180.9	74W タングステン 183.8	75Re レニウム 186.2	76Os オスミウム 190.2	77Ir イリジウム 192.2	78Pt 白金 195.1	79Au 金 197.0	80Hg 水銀 200.6	81Tl タリウム 204.4	82Pb 鉛 207.2	83Bi ビスマス 208.9	84Po ポロニウム (210)	85At アスタチン (210)	86Rn ラドン (222)	6
7	87Fr フランシウム (223)	88Ra ラジウム (226)	** 89~103 アクチノイド	<div>原子量の値は、IUPAC (国際純正および応用化学連合) 原子量委員会 の資料に基づいて、4桁の値を示した。[] をつけた値は、既知の同位体のうちよく知られたものの質量数である。</div>															

*
ランタノイド

**
アクチノイド

57La ランタン 138.9	58Ce セリウム 140.1	59Pr プラセオジム 140.9	60Nd ネオジム 144.2	61Pm プロメチウム (145)	62Sm サマリウム 150.4	63Eu ユウロピウム 152.0	64Gd ガドリニウム 157.3	65Tb テルビウム 158.9	66Dy ジスプロシウム 162.5	67Ho ホルミウム 164.9	68Er エルビウム 167.3	69Tm ツリウム 168.9	70Yb イットリビウム 173.0	71Lu ルテチウム 175.0
89Ac アクチニウム (227)	90Th トリウム 232.0	91Pa プロトアクチニウム 231.0	92U ウラン 238.0	93Np ネプツウム (237)	94Pu プルトニウム (239)	95Am アメリシウム (243)	96Cm キュリウム (247)	97Bk バークリウム (247)	98Cf カリフォルニウム (251)	99Es エンスハイム (252)	100Fm フェルミウム (257)	101Md メンデルビウム (258)	102No ノーベルリウム (259)	103Lr ローレンツウム (260)

図 1 元素の周期表

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H 1.008																	2 He 4.0026
3 Li 6.94	4 Be 9.0122											5 B 10.81	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180
11 Na 22.990	12 Mg 24.305											13 Al 26.982	14 Si 28.085	15 P 30.974	16 S 32.06	17 Cl 35.45	18 Ar 39.948
19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.956	22 Ti 47.867	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.38	31 Ga 69.723	32 Ge 72.63	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.798
37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.96	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.91	46 Pd 106.42	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.90	54 Xe 131.29
55 Cs 132.91	56 Ba 137.33	57-71 *	72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.84	75 Re 186.21	76 Os 190.23	77 Ir 192.22	78 Pt 195.08	79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
87 Fr (223)	88 Ra (226)	89-103 #	104 Rf (261)	105 Db (268)	106 Sg (271)	107 Bh (270)	108 Hs (277)	109 Mt (276)	110 Ds (281)	111 Rg (280)	112 Cn (285)	113 Nh (284)	114 Fl (289)	115 Uup (288)	116 Lv (293)	117 Uus (294)	118 Uuo (294)
* Lanthanide series			57 La 138.91	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.93	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.05	71 Lu 174.97
# Actinide series			89 Ac (227)	90 Th 232.04	91 Pa 231.04	92 U 238.03	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (262)

図 2 IUPAC の周期表

らの輸入に頼っている。「レア」といわれているが、世界埋蔵量の絶対値としては希少ではない。むしろ無尽蔵といってよいほど存在する。貴重な地下資源であることを認識すべきなのであるが、生産量の9割近くを中国が独占している背景には、採鉱から製錬に至る工程にかかるコストが安価で済み、著しい環境負荷が存在するという現実がある。これは重大な世界的環境問題なのである。

本稿では、中国語の元素周期表についてかなり詳しい解説を行う。その地球化学的アプローチの動機として、コモンズである地下資源、元素の循環について、人類の未来を見据えた認識を、中国の人々とも共有したいという思いが強い。

2 中国語周期表の特徴と概要

現在、中国で用いられている元素周期表を図3に示す。さらに、漢字一文字で表された元素名の中国語での読み（発音）を図4に示す。漢字は本来含み持つ情報量が豊かであるばかりでなく、一文字ならば同じ大きさの各元素の枠の中へのおさまりがよく、比較的に大きな文字での表示が可能となる。

金属元素は金偏、非金属元素は石偏、常温で単体が気体の元素にはきがまえ（气）、液体にはさんずい（氵）が用いられている。

『中国科技術語』2007年第4期55～58頁に『元素名称考源』（王宝誼 著）という論文があり、

氢 1 H		元素周期表																氦 2 He																									
锂 3 Li		铍 4 Be																硼 5 B		碳 6 C		氮 7 N		氧 8 O		氟 9 F		氖 10 Ne															
钠 11 Na		镁 12 Mg																铝 13 Al		硅 14 Si		磷 15 P		硫 16 S		氯 17 Cl		氩 18 Ar															
钾 19 K		钙 20 Ca		钪 21 Sc		钛 22 Ti		钒 23 V		铬 24 Cr		锰 25 Mn		铁 26 Fe		钴 27 Co		镍 28 Ni		铜 29 Cu		锌 30 Zn		镓 31 Ga		锗 32 Ge		砷 33 As		硒 34 Se		溴 35 Br		氪 36 Kr									
铷 37 Rb		锶 38 Sr		钇 39 Y		锆 40 Zr		铌 41 Nb		钼 42 Mo		锝 43 Tc		钌 44 Ru		铑 45 Rh		钯 46 Pd		银 47 Ag		镉 48 Cd		铟 49 In		锡 50 Sn		锑 51 Sb		碲 52 Te		碘 53 I		氙 54 Xe									
铯 55 Cs		钡 56 Ba		镧系		铪 72 Hf		钽 73 Ta		钨 74 W		铼 75 Re		锇 76 Os		铱 77 Ir		铂 78 Pt		金 79 Au		汞 80 Hg		铊 81 Tl		铅 82 Pb		铋 83 Bi		钋 84 Po		砹 85 At		氡 86 Rn									
钫 87 Fr		镭 88 Ra		锕系		104 Rf																																					
				镧系		57 La		铈 58 Ce		镨 59 Pr		钕 60 Nd		钷 61 Pm		钆 62 Sm		铽 63 Eu		镱 64 Gd		铥 65 Tb		镱 66 Dy		铥 67 Ho		铥 68 Er		铥 69 Tm		铥 70 Yb		铥 71 Lu									
				锕系		89 Ac		钍 90 Th		镤 91 Pa		铀 92 U		镎 93 Np		钚 94 Pu		镅 95 Am		锔 96 Cm		锫 97 Bk		锿 98 Cf		镄 99 Es		钔 100 Fm		钔 101 Md		钔 102 No		钔 103 Lr									

図3 中国語の周期表

元素周期表																	
氢 チン																	氦 ハイ
锂 リー	铍 ビー											硼 ボン	碳 タン	氮 タン	氧 ヤン	氟 フー	氖 ナイ
钠 ナー	镁 メイ											铝 リョウ	硅 グイー	磷 リン	硫 リョウ	氯 リョウ	氩 ナ
钾 ジャ	钙 ガイ	钪 カン	钛 タイ	钒 ファン	铬 ゲ	锰 モン	铁 ティエ	钴 グー	镍 ニエ	铜 トン	锌 シン	镓 ジャ	锗 ゾー	砷 スン	硒 シー	溴 シヨウ	氪 クー
铷 ズー	锶 スー	钇 イー	锆 ガウ	铌 ニ	钼 ム	锝 ドウ	钶 リヤ	钷 ラオ	钹 バ	银 イン	镉 ゲ	铟 イン	锡 シ	锑 ティ	碲 ディ	碘 デン	氙 シェン
铯 スー	钡 バー	镧系	铈 ハー	铈 タン	铈 ウー	铈 ライ	铈 ニ	铈 イー	铈 ボー	金 ジン	汞 ゴン	铊 ター	铊 チェン	铊 ビー	铊 ボー	砒 アイ	氡 ドン
钫 ファン	镭 レイ	镧系	铈 ルー														
镧系	镧 ラン	铈 スー	铈 ブー	铈 ニユー	铈 ボ	铈 シャン	铈 ヨ	铈 ガ	铈 ツ	铈 ディ	铈 フオ	铈 ニー	铈 デュー	铈 イー	铈 ルー		
镧系	铈 ア	铈 トゥー	铈 ブー	铈 ユー	铈 ナー	铈 ブー	铈 メイ	铈 ジュ	铈 ブエイ	铈 カイ	铈 アイ	铈 フエイ	铈 モン	铈 ヌー	铈 ラウ		

図4 中国語の元素名の読み（発音）

ここに漢字表記の化学元素名についての由来がまとめられている。それによれば、命名の由来として、①自然界に単体、遊離状態で存在し、古代中国で発見されて以来利用されてきたために慣用名で呼ばれているもの、②「会意造字」といわれ、単体物性の特徴という「意味」に合わせて作られたもの、③英語、ラテン語の発音を中国語訳した造語の3通りがある。①に属する元素は、金、銀、銅、鉄、錫、硫黄、鉛、汞（水銀）等であり、日本でもなじみ深いだけでなく、表記も同じである。③に属する元素の漢字名は、いわゆる当て字がほとんどであり、内容はない。②の「会意造字」は含蓄が深いので、代表的元素について概要を記す。

- | | | |
|---|--------|--|
| 氢 | 水素 H | 最も軽い気体なので、軽気と書かれ、その後単漢字の氢となった。 |
| 氮 | 窒素 N | 空気中に窒素があることによって酸素が淡くなっているところから淡気と呼ばれ、その後単漢字の氮となった。 |
| 氧 | 酸素 O | 呼吸、燃焼等生物生存に欠かせないところから養気と言われていたので、養の羊の部分をとって氧となった。 |
| 氯 | 塩素 Cl | 塩素の単体が黄緑色であることから緑気と名付けられていた。 |
| 溴 | 臭素 Br | 刺激臭のある液体であるところから命名された。 |
| 硅 | ケイ素 Si | シリコンの音訳として矽が充てられたが、セレン、スズと似た発音となるので1955年に硅に変更された。 |
| 鉀 | カリウム K | 発見当時最も化学的に活発な金属であったところから、一番の意の甲に金偏が付けられた。 |

中国で最初に元素名の翻訳がなされたのは、『格物入門』（1870年）、『金石記別』（1871年）という書物においてであるが、当時はすべて西洋語の音訳であった。例えば51番元素アンチモンは、英語の antimony から「安的摩尼」であった。『化学初階』（1871年）と『化学鑑原』（1871年）から漢字一文字による命名が始まった。1932年に中国は、初めてとなる『化学命名原則』を発表し、元素記名の統一がなされて今日の形となった。漢字一文字は、単体物性にもとづいた偏とかまえによる大分類に固有の由来を表すつくりが加味されてできている。漢字表記の周期表中、非金属元素名を石偏としたところが、我が国をはじめ他国の周期表にはみられない大きな特徴である。金属ではない固体を古来「石」と呼んできたからであろう。

石偏が付く元素は、ホウ素（硼）、炭素（碳）、ケイ素（硅）、リン（磷）、硫黄（硫）、ヒ素（砷）、セレン（硒）、テルル（碲）、ヨウ素（碘）、アスタチン（砹）の合計10個である。これらの元素のうち生体構成元素であるC, S, P, Iの重要性はいうに及ばず、他の元素も半導体素材などとして重要な一群を形成している。アスタチンAtは第5番目のハロゲンではあるが、天然にはわずかしかな存在せず、核反応で合成されたAt元素は半減期7.2時間の放射性同位体であった。このような元素を、ハロゲンだからといって若者たちに暗記を強いる必要があるだろうか。これに対して、セレンSeとテルルTeの化学には今後大きな展開が予想される。1975年に一連の有機セレンシアノ化合物が合成されて以来、有機セレン化合物の酸化によるセレン基の脱離により、アルケンやアリルアルコールが高収率で得られることなどがわかってきた。セレン化学の将来性は大きい。

3 元素の地球化学的分類

漢字表記の周期表では、単体が固体である元素のうち金属を金偏、非金属を石偏で表している。また、常温で単体が気体の元素がきがまえで表されている。これとよく似た化学元素の分類が存在するのである。それは地球化学者 Goldschmidt によるものである。Goldschmidt は、多数の隕石の分析値から、金属相、硫化物相、およびケイ酸塩相の間の元素の分配を考察した。そして、金属相に濃縮する元素を親鉄元素と名付けた。さらに、硫化物をつくりやすい元素を親銅元素、ケイ酸塩相中に濃縮して岩石を形成する元素を親石元素に分類した。Goldschmidt による元素の地球化学的分類をまとめて表1に示す。この分類は、地球よりも還元的环境下におかれた隕石の分析結果から導かれたものなので、このままで地球上の元素分布を表すものではないが、地球の進化過程における元素の行動を整理するうえで有用である。部分的にその特性を示すものとして親気元素にHとOを加え、ハロゲンのうちのBrと親石元素（I, At）を除けば、漢字表記周期表のきがまえ（気）元素群と一致する。

地球化学的分類と周期表との関係を整理してみる。周期表の左方から中央までと右上方に親石元素、中央下部に親鉄元素、その右隣りに親銅元素が集まっており、親気元素は右端と右上隅にかたまっている。元素の分布は物理・化学的特性によって決まるから、このような対応が存在するのは当然であるが、原子の内部構造など分からなかった時代に周期表を完成させたメンデレーエフの偉業に驚嘆するのである。次に、地球化学的元素分配の仕組みを結晶格子形成の立場からみてみたい。

表1 Goldschmidt による元素の地球化学的分類

特 性		元 素
親鉄元素	金属鉄と親和性をもつ	Fe, Co, Ni, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, Mo, W, Re, Au, Ge, Sn, C, P, (Pb, As, S)
親銅元素	硫化物鉱物をつくりやすい	Cu, Ag, Zn, Cd, Hg, Ga, In, Tl, (Ge, Sn), Pb, As, Sb, Bi, S, Se, Te, (Fe, Mo, Cr)
親石元素	酸化物イオンと結合しやすい	Li, Na, K, Rb, Cs, Be, Mg, Ca, Sr, Ba, B, Al, Sc, Y, 希土類, (C), Si, Ti, Zr, Hf, Th, (P), V, Nb, Ta, Cr, (W), U, F, Cl, Br, I, Mn, (H, Tl, Ga, Ge, Fe)
親気元素	大気圏を構成する気体になりやすい	N, He, Ne, Ar, Kr, Xe

親石元素は、主にイオン半径の適合性により、酸化物やケイ酸塩の結晶格子に入りやすい。まず、Na, Mg, Ca, Cl, Brなど希ガス型電子配置のイオンになりやすい元素が該当する。次には、d軌道の定員の半分以上にしか電子が入っていない遷移元素 (Ti, V, Cr, Y, 希土類) およびB, Al, Siが該当する。金属性親石元素は、一般に、鉄よりも酸化を受けやすい。これに対して、親鉄元素はすべて鉄よりも還元電位が高い (イオン化傾向が小さく単体になりやすい)。親鉄元素は地殻やマントル中で還元されたのちに中心核へと移動する。親銅元素の特徴は、硫化物イオンなどの大きな陰イオンに対して強い親和性を持つことである。これらの硫化物は水に不溶であり、後述する無機定性分析において、酸性溶液から硫化物を沈殿する陽イオンは、すべて親銅元素である。

Goldschmidtの分類のほかに、元素の分類法として、生物圏で重要な元素という意味で「親生元素」と呼ばれるものがあり、C, H, O, N, P, S, Cl, Iの8元素がこれに属し、B, Ca, Mg, K, Na, V, Mn, Feを準親生元素と呼ぶことがある。

中国語周期表の元素分類は、常温における単体の状態にもとづいているので、上記地球化学的分類法とは視点が異なっている。非金属に石偏が用いられている点が秀逸である一方、親石元素には金属性のものと非金属性のものがあるので、誤解しないことが肝要である。

4 定性分析化学と周期表

多数のイオンを含んだ溶液から成分イオンを分離・特定する無機定性分析は、大学化学教育の基礎として、課程内に組み込まれてきた。今日、化学研究の現場では、発光分光分析などの分析機器により、湿式よりもはるかに迅速・鋭敏に元素の検出がなされるので、陽イオン定性分析の実用性は薄れてきている。しかし、定性分析は世界共通に化学者に最も親しまれてきた技術であり、その教育的価値は失われていない。筆者は、長年にわたって化学実験教育に携わってきた経験から、化学研究の基本操作の習得というプラクティカルな意味にとどまらず、元素周期表との深いかかわりを実感している。ここでは、陽イオンの分属操作が地球進化における元素の分配行動に対応していることを述べてみたい。硫化物法と呼ばれている最もポピュラーな分属方法を表2に示す。

表2 陽イオンの分属

属	分属試薬	陽 イ オ ン	希元素のイオン
第1属	HCl	$\text{Ag}^+ \text{Hg}^{2+} \text{Pb}^{2+}$	Tl^+
第2属	H_2S （酸性）	銅亜属： $\text{Hg}^{2+} \text{Pb}^{2+} \text{Bi}^{3+} \text{Cu}^{2+} \text{Cd}^{2+}$	白金属元素 Au^{3+} $\text{Se} \text{Te} \text{Ge}$
		スズ亜属： $\text{As}^{3+} \text{As}^{5+} \text{Sb}^{3+} \text{Sb}^{5+} \text{Sn}^{2+} \text{Sn}^{4+}$ （2つの亜属の分離は $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ による）	
第3属	$\text{NH}_4\text{Cl} + \text{NH}_3$ 水	$\text{Al}^{3+} \text{Fe}^{3+} \text{Cr}^{3+}$	$\text{Be}^{2+} \text{Sc}^{3+}$ ランタン系列元素 アクチニウム系列元素 $\text{Ga}^{3+} \text{In}^{3+} \text{Tl}^{3+} \text{Si}^{4+} \text{Ti}^{4+} \text{Zr}^{4+} \text{Hf}^{4+}$ $\text{Nb}^{5+} \text{Ta}^{5+}$
第4属	H_2S $\left(\begin{smallmatrix} \text{NH}_3 \text{ 水} \\ \text{アルカリ性} \end{smallmatrix} \right)$	$\text{Zn}^{2+} \text{Mn}^{2+} \text{Co}^{2+} \text{Ni}^{2+}$	
第5属	$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$	$\text{Ca}^{2+} \text{Sr}^{2+} \text{Ba}^{2+}$	$\text{Li}^+ \text{Ra}^{2+}$
第6属	—	$\text{Mg}^{2+} \text{Na}^+ \text{K}^+ \text{NH}_4^+$	$\text{Rb}^+ \text{Cs}^+$

第1～4属の元素のうち、第3属のAl, Crを除いた多くの元素は、水溶液から硫化水素 H_2S によって難溶性の硫化物を沈殿する。第1属と第2属は硫化物の溶解度積 K_{sp} がとくに小さく、酸性溶液から硫化物を沈殿するが、そのうちで塩化物の溶解度の小さいものを第1属としてあらかじめ除いておくのが定法である。第3属は第1・2属を除いた後、アンモニアアルカリ性としたときに水酸化物を沈殿するグループである。このときの濾液に H_2S ガスを通じたとき硫化物を沈殿するグループが第4属である。第5属と第6属は、硫化水素を通じても硫化物が沈殿しないグループで、そのうち炭酸塩の溶解度積が小さいアルカリ土類金属元素を第5属、炭酸塩を沈殿しないアルカリ金属元素を第6属としている。このような系統分析の基本方針は、HCl, H_2S , NH_3 水などの分属試薬を加えたとき、溶解度積に達したイオンが沈殿し、達しないイオンが溶液に残るという化学平衡論が原理となっている。

次に、上述の分属表（表2）が周期表（図1）と密接な関係にあることを確認してみたい。分属操作第1～2属の元素であるAg, Hg, Pb, Cu, Bi, Sn, As, Sb, Cdは、周期表上11・12・13・14・15族である。第3～4属のFe, Cr, Al, Mn, Ni, Co, Znは、ZnとAl以外みな周期表の中央およびその左側の位置を占めている。第5～6属は硫黄と化合しないイオンであり、それらは規則正しく周期表の左端に位置している。第1～4属は硫黄と化合しやすいもので、銅を代表とする一群ということで「親銅元素」、硫黄と化合しない第5～6属は、自然界で岩石を形成する元素であるため「親石元素」と名付けられたことは前章で述べた。次に、地球の生成から進化の過程を、元素の分配（＝定性分析化学の分属）と対比させながらまとめてみる。

地球の年齢は46億年といわれている。太陽の周辺に散らばっていた多くの小天体が集まって微惑星となり、それらが衝突を繰り返して地球に成長したとする説が有力であり、地球構成物質が—か所に凝集した時期を地球の誕生とするのが一般的な考え方である。この段階で、揮発性で不活性な希ガス元素や N_2 の宇宙への散逸があるが、地上に残された部分は大気圏に濃縮して親気元素となった。このとき、酸化物、ケイ酸塩、炭酸塩などは固相としてとどまったと考えられる。 SiO_2 とケイ酸塩が安定な化合物であることにより、OとSiはクラーク数の1, 2を占めることになる。存在度の高かった金属の中で鉄は最も酸化されにくく、さらに、酸素・硫黄との化合

当量以上存在していたために、融解金属相を形成したと考えられる。鉄原子の原子核中の核子間の結合力は全元素中最も強く、その安定性のために、鉄は星の中で核融合によって元素が合成されていったときの終着駅となった。そのため鉄は宇宙にも地球上にも豊富に存在するのである。

液体の鉄は高密度であるから地球の中心部にゆっくりと移動し、その過程で反応性の乏しい Ni, Au, Ptなどを還元して合金化していった。低密度のケイ酸塩、酸化物、硫化物は、熔融鉄の上に浮き、地球構成の3要素である中心核、マントル、地殻の層状構造が形成されたと考えられる。塩基性の強いアルカリ金属とアルカリ土類金属は、いち早く酸素と化合し、Ag, Cu, Znなどは硫黄と結合し、比重の違いにより、岩石層、硫化物層、Fe・Ni核の層状分配となったのである。地表に生活するわれわれは岩石層の上にいるわけであるから、この層の下にある硫化物層の元素は地表では希少になるのである。したがって、鉱脈という形で岩石層の割れ目を通して地表に到達した金属硫化物から親銅元素を採取することになるのである。こうした鉱物資源は Fe, Co, Ni, Au, Ag, Cu, Zn, Hg, Sn, Pb, As, Sbなどである。

5 鉱床の形成と金属元素の濃縮

地殻には、ある特定の元素や鉱物が平均的な岩石（ケイ酸塩）に比べて著しく濃縮している場所がある。そのような場所のうち、とくに経済的な利用価値のあるものを鉱床と呼んでいる。さらに、鉱床を形成する有用鉱物の集まりは鉱石と呼ばれている。鉱床や鉱石となりうるか否かは、経済的側面が支配的となるので、元素や鉱物の回収技術の進歩によって鉱床の範囲が拡大することになれば、半導体や超電導コイル（強力磁石）のための鉱物資源のように今まで認識されていなかった新しい鉱床が出現することもある。

現在われわれの資源の大部分を供給する地殻の進化は、地球の冷却とケイ酸塩の晶出によって終了したのではない。地殻が分化してから約40億年の間に、最初に晶出した火成岩に対して様々な変化がもたらされた結果、鉱床が形成されたと考えられている。高温のマントルから地殻に突き出てくるもの、火山活動によって地殻から押し出されるものなどがあり、それらの過程はしばしばある特殊な元素を含む化合物の濃縮をもたらした。金属元素の濃縮すなわち鉱床の形成の原因として以下のような地質学的作用が考えられている。

- ①マグマの結晶分化作用 ②熱水鉱化作用 ③海底熱水系に伴う鉱化作用 ④堆積作用
- ⑤変成・風化作用

親銅元素資源は、主として硫化物鉱床から採取されるので、その出現には、硫化物イオンの供給源である硫化水素 H_2S の存在が前提となる。そこで、硫黄化学種の安定存在条件を表す状態図を検討してみる（図5）。図5の縦軸は酸素分圧の対数であり、大きい値は酸化的環境、小さい値は還元的環境下にあることを意味する。一方、横軸は水素イオン指数 pH すなわち水溶液環境の酸性・アルカリ性の度合いを示している。これを見ると、 H_2S の安定存在条件は、酸素分圧の低い還元的環境で、なおかつ pH の小さい酸性環境であることがわかる。なお、硫黄の単体である斜方硫黄の析出領域が化学式 S で示されているが、逆に、斜方硫黄の存在は酸性環境の証左となる。さらに、中性～アルカリ性で酸化的環境であれば、硫酸イオン SO_4^{2-} が広く安定に存在することも理解される。

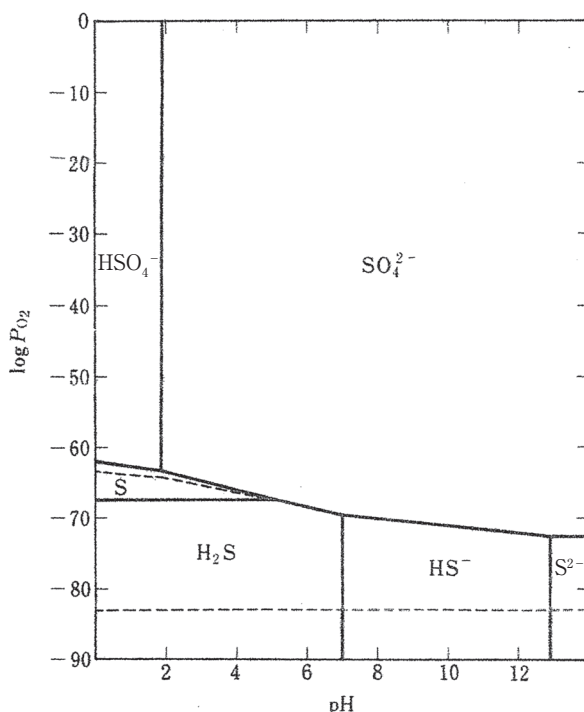


図5 硫黄化学種の酸素分圧－pH 図

①～⑤の各作用によってできた世界の鉱床の例を挙げてみよう。

① マグマの結晶分化作用

マグマはあらゆる金属元素を含んでおり、温度の低下につれて鉱物と残存融体（メルト）の間で元素が分配される。南アフリカのブッシュフェルト貫入岩体では、クロマイトや磁鉄鉱が濃縮された薄層が鉱床をなしている。また、硫化物メルトがケイ酸塩メルトから分離するマグマ不混和によってNiやCuの硫化物が晶出した岩相の例としてカナダのサドベリー貫入岩体がある。マグマの結晶作用が進むと鉱物相に入りにくい元素は残存メルト中に濃縮される。アルカリ金属や軽希土類元素（La, Ce, Pr, Nd）のほか、Cu, Ag, Zn, Pbも濃縮される。

メルト中の SO_2 は、873Kで鉄鉱石と平衡にあるとき、 H_2O と反応（不均化反応）して H_2S と SO_4^{2-} を生じる。その結果、ボーフィリイ（斑岩）型鉱床では、Cu, Mo, Auの硫化物に伴ってセッコウ CaSO_4 の晶出がみられる。

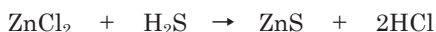
② 熱水鉱化作用

マグマから分離した熱水のほかに、マグマによって熱せられた地下水が岩石中を循環して、岩石と反応してできる熱水の寄与が考えられる。地熱地域のボーリング試料が金属硫化物を含む例が報告されている。カリフォルニア州のSalton SeaやニュージーランドのTaupo火山帯の地熱地帯では、重金属に富む高塩濃度の熱水活動が知られている。ネバダ州やカムストックの金銀鉱床では、熱水系においてAuが H_2S と反応して硫化物錯体 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ をつくって溶解し、熱水の沸騰によって H_2S が気化するとともにAuが沈殿している。ここでは、 H_2S はCu, Zn,

Pbなどベースメタルの沈殿の場合とは逆にAuの溶解度を増す働きをしている。

③ 海底熱水系に伴う鉱化作用

海底火山の活動によって形成される熱水系は、当然、塩濃度が高い。キプロス島やオマーンのおフィオライトに伴う鉱床、わが国の別子型鉱床も深海性玄武岩に伴う塊状硫化物鉱床である。高濃度の Cl^- によって塩化物として溶解した金属元素が H_2S と反応して濃縮鉱床が形成される。Znを例にとると反応式は次のようになる。



④ 堆積作用

地球上の広範囲にわたり、長期間一定条件で形成されるため、堆積層は一般に大規模で、鉱床もまた大規模なものとなる。世界の鉱物資源の主要な部分がこれによって占められる。海嶺や深海底にみられるMnノジュールがその典型であるが、ミシシッピバレー型と呼ばれる一群の鉱床が存在する。硫黄同位体比の研究により、ここでは、Sが SO_4^{2-} のバクテリア還元作用で生じた H_2S を起源とすることがわかっている。この鉱床の鉱化溶液は、油田塩水と同起源の高塩濃度地層水と考えられており、金属元素を塩化物錯イオンとして溶解した堆積盆中の層間水が石灰岩中で生物起源の硫化水素と反応して硫化物を沈殿したものと思われる。

⑤ 変成・風化作用

ボーキサイトのAlやラテライト中のFe,Ni鉱床は、風化作用（weathering）によって他の元素が溶脱し、残留固相にこれらの元素が濃縮した例である。世界で最も大きなボーフィリイ型Cu鉱床であるチリのChuquicamata鉱床では、風化作用の進行に伴って、水溶液中に溶解したCuが CuS や Cu_2S として再沈殿し、二次富化帯を形成して濃縮したと考えられている。

6 レアアース・レアメタル

周期表3族に属するスカンジウムSc（原子番号21）、イットリウムY（39）およびランタノイド（57～71）の17元素を総称してレアアース元素（rare earth element）直訳して希土類元素という。比較的希な鉱物から得られたため「希土類」と命名されたが、地殻全体中の存在量は決して希少ではない（図6）。レアアース元素は様々な用途に使われてきたが、最新技術への利用は日本の発明が多い。強力な固体レーザー（YAG）や三波長蛍光管などにレアアースが使われているほか、ネオジウム磁石は、ハイブリッドカーやコンピュータのハードディスク装置、携帯電話やMRIなどのハイテク機器、あらゆる種類の発電機やモーターに使われており、現代社会に欠かせない素材となっている。

希土類元素の持つ素材としての高い価値は、すべてその電子配置に原因がある。電子軌道のエネルギー準位は、 $4d < 5p < 6s < 4f < 5d$ なので、6s軌道に2つ電子が入ったあと、内側の4f軌道に電子が入ってランタンLaからルテチウムLuまでの15元素が現れる。この電子軌道では、6s電子が2つ取れ、4f電子が1つ取れて3価の陽イオンとなったときエネルギー的に安定となるので周期表3族に収容されるのである。希土類原子に外部からエネルギーが与えられたとき、内殻電子がもつエネルギーが熱となって損失することがないので、効率的に光エネルギーに変換される。また、酸化物結晶の特徴から研磨剤として有用なものや、保磁力の高さから強力磁石の原

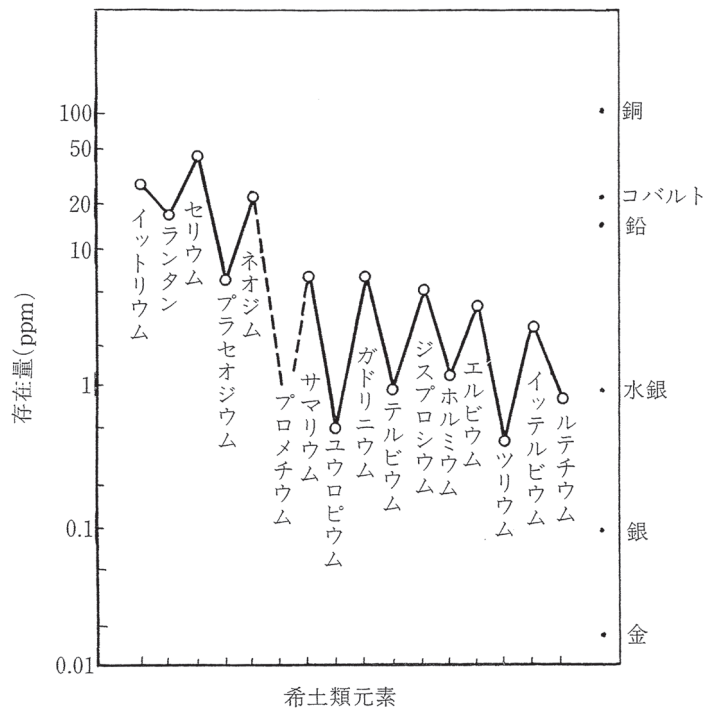


図6 地殻中の希土類の量

料となるものなどがあり、レアアースは現代日本の先端産業を支えているといえる。

日本のレアアース需要は、世界需要の半分を占めており、関連する下流製品の出荷シェアも大きい。希土類元素は原子量の順に、軽希土類、中希土類、重希土類に分類される。通常の鉱石では、軽希土類であるセリウム Ce、ランタン La の割合が多く、ジスプロシウム Dy、テルビウム Tb など重希土類の割合は小さい。近年、供給の安定性が危惧されているのは、ジスプロシウムなどの重希土類である。唯一中国南部に存在するイオン吸着鉱が比較的重希土類を多く含むといわれている。レアアースの世界生産量をみると、2014年酸化物換算で、2位アメリカの7千トンをはるかに上回り、中国は9万5千トンである。レアアースはみな金属性親石元素であり、漢字一文字で表記された元素名は、その重みを増してきている。

一方、「レアメタル」という言葉が広く浸透しているが、その定義はあいまいである。“rare metals”は国際的には通用しない。EUでは“critical metals”などと言われている。わが国の資源エネルギー庁所管の担当部署では、31鉱種をレアメタルとしており、それらが供給特性によってグループ分けされたものを表3に示す。希土類元素がレアメタルの典型であるが、白金族元素やタングステンなどについても資源確保対策が必要視されている。レアメタルのわが国における需給政策に関し、資源エネルギー庁内の対策部会では、以下の4つの供給対策が重要と結論している。

- ①レアメタル探査の強化を中心とした海外資源の確保
- ②いわゆる都市鉱山の開発を含めたりサイクルの推進

③特殊な希少金属を使用しなくても機能を出現する材料の開発

④レア金属の備蓄

長期的視野に立った対策が明示されている点は評価されるが、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）によって、環境負荷軽減の立場から、さらに踏み込んだ検討が行われ、的確な提言がなされている。国と産業界は真摯に耳を傾けるべきであろう。NEDOの提言を参考にしながら、レアアースの環境問題について言及してみたい。

表3 レア金属の供給特性によるグループ分け

グループ	特 性	金 属
①	本質的に資源量が希少である	白金族金属（PGM）など
②	実用素材の製造が困難で供給が少ない	チタン（Ti）、タンタル（Ta）、ニオブ（Nb）などの高融点金属など
③	自然による濃縮作用がなく、専用の鉱石がほとんど存在せず、副産物で産出される	インジウム（In）、ガリウム（Ga）、スカンジウム（Sc）など
④	実用材料での使用量が少なく、絶対量が必要でない金属など	セレン（Se）、テルル（Te）、ビスマス（Bi）
⑤	特定の国で産出もしくは生産されており、そのため供給リスクの可能性が高い金属など	希土類元素（REES）、タングステン、アンチモン（Sb）

図6に示したように、レアアース資源の絶対量は十分であるが、生産国に大きな偏りがある。埋蔵量は世界全般にわたっているものの、生産量ベースでは、レア金属危機が終了したとされる現在でも中国一辺倒である。その原因は中国における安価な生産市場にあり、最大のポイントは、採掘から製錬に至る過程での環境コストの差である。古くから開発されている軽希土類鉱山の一つ白雲鄂博（Bayan Obo）鉱山は、本来鉄鉱石の鉱山であり、希土類は副産物として回収されてきたのであるが、希土類元素鉱山につきものの放射性元素トリウムTh、ウランUの処分・管理が不十分のまま操業されている。また、酸化物原料から金属への製錬においては、フッ化物を用いた熔融塩電解による採取が必要であり、その際にフッ化水素HFを含む排ガスが発生する。さらに、溶媒抽出法の利用では、有害な重金属を多量に含む酸や有機溶媒廃液も生成する。中国では、これらに対応するための環境負荷コストが著しく少ないのである。日本のような環境規制が厳しい国に放射性元素などの難処理有害物を含む希土類鉱石を持ち込んで製錬することは、環境コストが高くついて採算が取れない。日本では、資源量の偏在のみに注目した報道が多くなされるが、環境負荷やプロセスコストを無視した産業政策に意味はないことをコンセンサスとすべきであろう。

石油・石炭は言うに及ばず、人類が利用している地下資源は、地球が何万年、何億年という長い年月を費やして地殻に濃縮したものを選んで採掘したものである。とりわけレアアース・レア金属は、地球の奇跡（miracle of earth）の産物であり、本質的価値（value of nature）が極めて高いものである。貴重な天然資源を循環させて使う持続性社会の形成に知恵を絞らなければならない。一度掘り出したレアアース・レア金属は、廃棄せずに循環利用を徹底すべきである。濃縮鉱床を高エントロピーの固体廃棄物へと変形してしまうプロセスは、工業化文明の一樣相で

あり、結局人類は大きな後悔をすることになるのではないか。

謝辞

本稿をまとめるにあたり、本学大学院環境学研究科環境マネジメント専攻の学生 林燦烽、坂崎和晴、佐藤勇輝 の各位には多大な協力をいただいた。ここに感謝申し上げる。

参考・引用文献

- 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（2016）『解説 レアメタル』日刊工業新聞社。
島海光弘ほか（2011）『地球内部ダイナミクス』岩波書店。
D.N. トリフォノフ, V.D. トリフォノフ『化学元素発見のみち』（阪上正信ほか訳 1996）内田老鶴圃。
松尾禎士監修（2006）『地球化学』講談社。
井上勝也監修 中村正和、菅沼恭子著（1991）『希土類の輝き』研成社。
高木仁三郎（2001）『元素の小事典』岩波書店。
J.W. ムーア, E.A. ムーア『環境理解のための基礎化学』（岩本振武訳 1989）東京化学同人。
藤原鎮男、森永健一、田中郁三（1976）『化学の基礎』大日本図書。
一国雅巳（1972）『無機地球化学』培風館。
化学同人編集部（2013）『ケミストを魅了した元素と周期表』化学同人。
王宝誼（2007）「元素名称考源」中国科技術語、第4期、55～58。